

Из таблицы следует, что при высоком содержании в руде монооксида железа (период испытаний 1) количества выделившейся теплоты вполне достаточно, чтобы компенсировать затраты теплоты на разложение карбонатов. Расчетами установлено, что при увеличении содержания FeO в исходной руде на 1 % расход природного газа снижается на 0,40 м³/т обожженной руды. Увеличение содержания CaO в руде на 1% увеличивает расход природного газа на 1,75 м³/т обожженной руды. Возрастание в руде содержания NgO на 1 % повышает расход природного газа на 1,40 м³/т.

Таблица 1

Химический состав проб сидеритовой руды, пересчитанный
на содержание в них карбонатов

Наименование компонентов сидеритовой руды	Периоды испытаний				
	1	2	3	4	Среднее за периоды
FeCO ₃	63,05	60,80	58,86	54,83	58,70
Fe ₂ CO ₃	3,97	2,00	4,70	2,65	2,80
CaCO ₃	3,57	6,43	3,84	10,89	6,12
SiO ₂	6,50	5,90	4,81	5,00	8,11
MgCO ₃	18,41	20,71	22,89	22,59	19,77
MnCO ₃	1,94	1,94	1,94	1,94	1,99
Al ₂ O ₃	2,46	2,03	2,80	1,93	2,35
S	0,10	0,19	0,16	0,17	0,16

Следовательно, для стабильной работы шахтных печей необходимо производить усреднение исходной сидеритовой руды перед обжигом.

Список использованных источников

1. Юрьев Б.П., Меламуд С.Г., Спирин Н.А. Исследование кинетики диссоциации бакальских сидеритовых руд // Известия вузов. Черная металлургия, 2012. № 10. – С. 12–14.
2. Салем Р.Р. Физическая химия. Термодинамика. – М.: Физматлит, 2004. – 352 с.
3. Кипер Р.А. Физико-химические свойства веществ: справочник по химии. – Хабаровск: Прондо, 2013. – 1016 с.

УДК 621.746.584

Ю. Г. Ярошенко¹, Ю. И. Липунов², А. Б. Смаханов¹

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург,

² ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» – ОАО «ВНИИМТ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОДО-ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СТАЛЬНЫХ КОЛЕЦ

Аннотация

В статье приведены результаты экспериментальных исследований процесса охлаждения стальных колец водо-воздушной смесью, которые были получены на экспериментальной установке опытного стенда ОАО «ВНИИМТ». Исследования проведены для широкого диапазона изменения параметров водо-воздушной смеси, что позволило изучить зависимости теплового состояния колец различной толщины от параметров режима охлаждения

ния. При опытном термическом упрочнении водо-воздушной смесью подшипниковых колец из стали ШХ15 установлены условия, при которых достигается требуемый ТУ уровень механических свойств и структуры металла. Технология водо-воздушного охлаждения по ее организации, качеству конечного продукта и экологическим показателям способна заменить традиционную для подшипниковых колец технологию объемной закалки в масляном баке.

Ключевые слова: водо-воздушное охлаждение, термоупрочнение, закалка, форсунка, коллектор, сталь, кольца.

Abstract

In paper results of the experimental researches cooling of rings from steel with a water-air mixture, which were obtained at the experimental installation of the experimental stand of OJSC «VNIIMT». The investigations were carried out for a wide range of changes in the parameters of the water-air mixture, which made it possible to study the dependence of the thermal state of rings of different thicknesses on the parameters of the cooling regime. Experimental thermal hardening with a water-air mixture of bearing rings made of 52100 (EN1.3505) steel establishes the conditions under which the level of mechanical properties and structure of the metal required by the «Technical Condition» is reached. The technology of water and air cooling by its organization, the quality of the final product and environmental indicators is able to replace the traditional for bearing rings technology of bulk hardening in the oil tank.

Keywords: air-water cooling, heat-strengthening, hardening, nozzle, collector, steel, rings.

Стандартной технологией термоупрочнения подшипниковых колец из стали ШХ15 является нагрев в печи до температуры 860 °С с последующей выдержкой, закалка погружением в масляный бак и низкотемпературный отпуск в течение 2 часов при температуре 160 °С [1, 2]. После термообработки твердость колец должна быть не ниже HRC 62, а микроструктура стали – состоит из мелкоигольчатого мартенсита отпуска и равномерно распределенных избыточных карбидов.

Известно, что технология объемной закалки в масляном баке имеет ряд недостатков, связанных с высокой стоимостью, пожароопасностью и с загрязнением окружающей среды. Однако, главными и неустраняемыми недостатками являются недостаточная интенсивность охлаждения в интервале структурных превращений и невозможность управления процессом.

Использование систем водо-воздушного охлаждения обеспечивает снижение себестоимости процесса и улучшение экологической обстановки, а также за счет регулирования скорости охлаждения в определенных температурно-временных пределах получение требуемого уровня свойств по качеству металла при минимизации остаточных напряжений и устранении трещинообразования и коробления [3–6].

Исследования процесса водо-воздушного охлаждения колец из низколегированной и подшипниковой сталей проведены на опытно-промышленном стенде ОАО «ВНИИМТ» (рис. 1). Стенд включал нагревательную печь (1), раму с рольгангом для транспортировки образцов (2), размещенные на раме элементы охлаждающего устройства (3), (5) и вспомогательное оборудование: бак для воды, шкаф управления и щит контрольно-измерительной аппаратуры. Кольца помещали на сетчатый поддон (5), нагревали в печи, после чего их охлаждали снизу и сверху плоскими водо-воздушными потоками при реверсивном перемещении поддона в зоне охлаждения. Контроль температуры в печи проводили по показаниям пирометров, а температуру поверхности колец измеряли приваренными к их поверхности термопарами ТХА. Фиксация показаний пирометров и термопар осуществлялась при помощи измерительного блока, оснащенного компенсационными проводами. Частота записи показаний термопар в текстовый файл составляла 0,1 секунды.

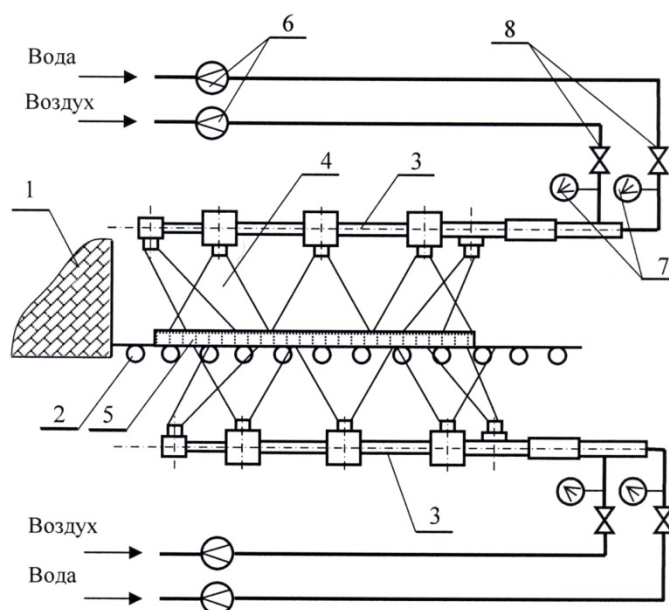


Рис. 1. Схема экспериментальной установки водо-воздушного охлаждения:

- 1 – нагревательная печь; 2 – рольганг; 3 – верхние и нижние коллекторы со смесителями и боковыми и центральными форсунками; 4 – водо-воздушный факел;
5 – сетчатый поддон с кольцами; 6 – расходомеры на подводах воды и воздуха;
7 – манометры для воды и воздуха; 8 – регулировочные вентили на подаче воды и воздуха

Для производства водо-воздушной смеси использовали смеситель оригинальной конструкции. Подачу водо-воздушной смеси на образцы осуществляли через систему коллекторов с плоско факельными форсунками.

Известно, что интенсивность теплоотдачи, а следовательно, и скорость охлаждения, при водо-воздушном охлаждении зависит от давления воды и воздуха, от соотношения расходов воздуха и воды, а также от плотности орошения смеси, поступающей на охлаждаемую поверхность [3, 6, 7]. Кольца различных размеров из низколегированной и подшипниковой стали охлаждали, используя водо-воздушное охлаждение как по режиму закалки, так и по режиму прерванного охлаждения. При закалке образцы помещали в зону охлаждения на время, достаточное для их охлаждения до температуры ниже 100 °С. При прерванном охлаждении образцы извлекались из зоны охлаждения через различные промежутки времени, далее образцы остывали на воздухе, и температура по их сечению выравнивалась за счет тепла внутренних слоев до значения среднemasсовой температуры окончания охлаждения.

Экспериментальные исследования проведены в широком диапазоне изменения параметров водо-воздушной смеси и времени охлаждения, границы которого представлены в табл. 1, что позволило установить зависимости теплового состояния колец от параметров режима охлаждения.

Таблица 1

Пределы изменения параметров водо-воздушного охлаждения

Режим охлаждения	Расход на верхние и нижние коллекторы, $\text{м}^3/\text{с} \cdot 10^{-4}$		Отношение расходов воздуха / вода, ед.	Плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	Время охлаждения, с	Температура окончания охлаждения, °С
	воды	воздуха				
Закалка	1,4 ÷ 11,1	361 ÷ 833	47 ÷ 160	1,05 ÷ 5,49	до 60	< 100
Прерванное охлаждение	2,63 ÷ 13,2	344 ÷ 583	43 ÷ 152	1,98 ÷ 3,66	2,7 ÷ 10	690 ÷ 110

На рис. 2 представлены примеры показаний термопар, приваренных на поверхности колец, при охлаждении в режиме заковки и в режиме прерванного охлаждения, полученные при разных параметрах водо-воздушной смеси и времени охлаждения (табл. 2).

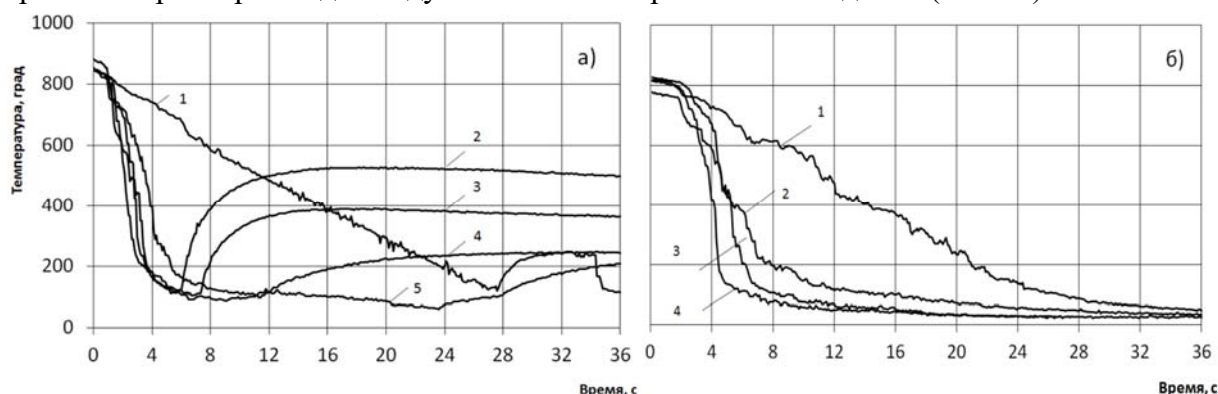


Рис. 2. Примеры показаний термопар: прерванное охлаждение (а), заковка (б)

Таблица 2

Экспериментальные режимы водо-воздушного охлаждения

Номер кривой на рис. 2	Расход, м³/с·10 ⁻⁴		Примечание
	воды	воздуха	
Прерванное охлаждение (рис. 2, а)			
1	2,72	414	Время охлаждения 26 сек. После выравнивания повторное охлаждение до заковки
2	10,4	483	Время охлаждения 4,6 сек
3	10,4	483	Время охлаждения 5,6 сек
4	10,4	483	Время охлаждения 7,9 сек
5	от 6,9 до 1,4	472	Дифференцированное охлаждение с уменьшением расхода воды и чередованием работы верхних и нижних коллекторов. Время охлаждения 27 сек.
Заковка (рис. 2, б)			
1	2,64	419	
2	5,6/2,8	135/137	Дифференцированное охлаждение. Смена расхода воды через 5 сек.
3	4,16	416	
4	6,8	163	

Очевидно, что увеличение расхода воды (а следовательно, и плотности орошения) приводит к увеличению скорости охлаждения, а увеличение времени охлаждения при прочих равных параметрах приводит к уменьшению температуры окончания охлаждения.

На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость снижения температуры колец в зависимости от времени их охлаждения, полученная при расходе воды 0,0013 м³/с, для колец различной толщины.

На основе экспериментальных данных, полученных при прерванном охлаждении, по уравнению теплового баланса рассчитали средний удельный тепловой поток, отводимый от поверхности кольца в процессе его охлаждения по формуле:

$$\bar{q} = (c_{н.охл} t_{м.н.охл} - c_{к.охл} t_{м.к.охл}) \frac{m_k}{\tau_{охл} \cdot S_k}, \quad (1)$$

где $c_{н.охл}$, $c_{к.охл}$ – средняя теплоемкость стали при температуре начала и окончания охлаждения, соответственно, $t_{м.н.охл}$, $t_{м.к.охл}$ – среднемассовая температура начала и окончания охлаждения, соответственно, m_k – масса кольца, s_k – поверхность кольца, $\tau_{охл}$ – время охлаждения. Значения рассчитанного среднего удельного теплового потока для условий, при которых проводились исследования, находились в пределах от 0,22 до 1,2 МВт/м². Эти возможности позволили проанализировать широкий диапазон режимов охлаждения во времени как сравнимых с охлаждением в масляном и водяном баках, так и с охлаждением водо-воздушной смесью.

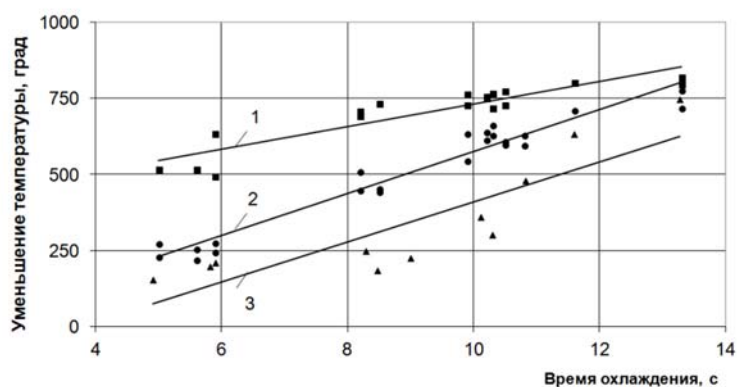


Рис. 3. Зависимость снижения температуры в процессе водо-воздушного охлаждения от времени охлаждения. Цифры у кривых: толщина кольца 1 – 3,7 мм; 2 – 4,5 мм; 3 – 6,5 мм.

Анализ механических свойств и оценка микроструктуры металла проведены для 2-х экспериментальных образцов подшипниковых колец, термически обработанных по технологии заковки таким образом, чтобы скорость охлаждения водо-воздушной смесью была близка к скорости охлаждения в масляном баке. Образцы вырезались из подшипникового кольца наружным диаметром 72 мм и толщиной стенки 6,1 мм. Режим охлаждения: расход воды 0,0085 м³/с, расход воздуха 0,0336 м³/с. Твердость упрочненного металла составила 63-65 HRC, микроструктура – мелкоигольчатый мартенсит (5 баллов, шкала №3 ГОСТ8233-56) и карбиды, что соответствует требованиям, предъявляемым к подшипниковым кольцам.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований водо-воздушного охлаждения стальных колец получены зависимости температуры колец от параметров процесса охлаждения для широкого диапазона изменения режимов охлаждения, рассчитана величина снимаемого с поверхности колец среднего удельного теплового потока. Определен диапазон режимов охлаждения водо-воздушной смесью, при которых достигается требуемый уровень механических свойств подшипниковой стали.

Список использованных источников

1. Машиностроение [Электронный ресурс]. – Толковый словарь терминов. Подшипниковая сталь. URL: <http://sl3d.ru/slovar/p/4434-podshipnikovaya-stal.html>.
2. Наседкина Я.И., Караваева М.В., Кайбышев О.А. Влияние комбинированной термо-механической обработки на структуру и механические свойства высокоуглеродистой подшипниковой стали. Вестник УГАТУ, Машиностроение, 2012, Т. 16, № 5 (50). С. 145–148.
3. Желудкевич М.С. Теплотехнологические основы управляемого водо-воздушного охлаждения при заковке изделий из железоуглеродистых сплавов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.т.н.: Спец. 05.16.01 / Желудкевич Мечеслав Станиславович; Белорус. гос. политехн. акад. – Минск, 2001. – 34, [2] с.: ил.; 21 см. – Библиогр.: с. 29–33 (53 назв.)

4. Машеков С.А., Абсадыков Б.Н., Алимкулов М.М. Физическое моделирование при исследовании влияния режимов прокатки и охлаждения водо-воздушной смесью на качество рельсов / Совр. пробл. Науки и обр. –2015. – №2. – С. 52.
5. Golovko A.N., Rodman D., Nürnberger F., Schaper M., Frolov Ya.V., Beliaiev S.M. / Investigation of the Water-Air Cooling Process of the ThickWalled Extruded Profile Made of Alloy En Aw-6060 on the Output Table // Metallurgical and Mining Industry. – 2012. - Vol. 4. - No. 2. pp. 66-74.
6. Yaroshenko Y.G., Startseva M.V., Lipunov Y.I., Eismondt K.Y., Nekrasova E.V. Developing a Modern Thermal Strengthening Technique for Regulated Fishplate Cooling. WIT Transactions on Ecology and the Environment. Vol. 190, №1, 2014, pp. 491–499.
7. Люты В. Закалочные среды. Справочник / Под ред. С.Б. Масленкова / Пер. с польск. Челябинск: Metallurgia, Челябинское отделение. 1990. – 192 с.